第24卷 第2期 海 洋 学 报 Vol.24, No.2
2002-03 ACTA OCEANOLOGICA SINICA March, 2002

珠江口外海沉积物(原状样)微结构特征及其物理性质

卢 博[1], 李传荣[2]

(1. 中国科学院 南海海洋研究所边缘海地质和古环境开放实验室, 广州 510301; 2. 中国科学院南海海洋研究所海洋仪器中心, 广州 510301)

摘要: 以第四纪地质土质学的显微结构理论和技术方法, 研究珠江口外海沉积物工程地质评价中存在的问题. 利用电子探针等微区分析方法深入分析软土结构、微结构的组构和层理以及分类特征, 结合原状样物理力学性质参数, 研究颗粒接触、堆垒、孔隙等现象与物理性质之间的关系. 分析研究表明, 珠江口外海沉积物存在着6个微结构类型, 其中混合接触结构的底质类具有较高的抗压强度.

关键词: 珠江口; 第四纪沉积物; 微结构; 土工学

中图分类号: P736.211, P642.113 **文献标识码**: A **文章编号**: 0253-4193(2002)02-0094-07

1 引言

珠江口是华南地区经济活动最频繁的区域之一, 工程项目不断增多, 不仅有沿海码头、跨海大桥、海岛及堤围建造、近海石油开发和管线铺设, 还有小至灯柱的建设, 都迫切需要了解其底质的工程性质, 以满足开发和建设的需要. 晚第四纪沉积物微结构的分析研究是第四纪地质地层学研究的延伸, 同时是微观技术方面与工程分析相结合的一种尝试, 它试图用微结构特征表达相应的地层和工程地质等物理性质, 为海底工程地质学的深入研究和拓展作出贡献.

软土(包括海相沉积物)的结构和微结构特征具有多样性特点, 并且与物质来源、颗粒沉淀的瞬间速度、水动力作用因素、颗粒接触堆垒状态有关, 是土(沉积物)的一个重要质量特征. 一方面反映了土体的形成条件, 另一方面又是决定土体(沉积物)物理力学性质的主要因素, 影响着软土的工程力学性质, 影响到工程建设安全性的正确评价. 国内文献指出, 个别结构和微结构类型一旦受到荷载影响或地震影响, 会产生土体或地基基础滑动变形、塌陷, 最终导致工

收稿日期: 2000-05-16; **修订日期**: 2000-09-04.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(49676286); 中国科学院广州分院、广东省科学院分析测试基金资助项目.

作者简介: 卢 博, (1952年—)男, 广东省新会市人, 副研究员, 从事海洋沉积物理学研究.

程结构物受损. 文献中给出了国内学者对于海相沉积物以及软土结构和微结构的最新研究成果，尤其温耀霖等对珠江口三角洲一带软土地质所作的分析研究[1]对珠江三角洲工程地质建设起到一定的指导作用.

珠江口外海(包括伶仃洋、黄茅海和磨刀门等) - 100 m 以浅的沉积物来源主要以每年珠江水系所携带的陆源物质为主. 近年来在这个海域内先后取样 3 次共 14 个站位，由于沉积物类型的差别，柱状取样长度从 40 cm 到 180 cm 不等. 按地理位置可划分为伶仃洋(B1 - 3)、香港外海(B3 - 6, B3 - 5)、澳门外海(B3 - 1, B3 - 2, 99 - D)以及出海口大陆架(831, 832, 833, 834, 835, 99 - C, 99 - B, B3 - 4). 具体站位和水深(m)范围见图 1.

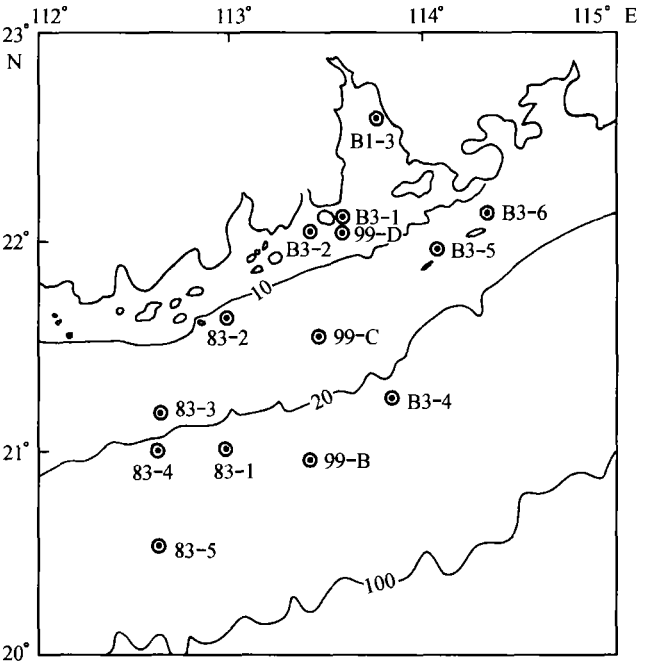


图 1　取样站位图

除了进行电子探针和扫描电镜分别观察沉积物结构和微结构之外，还进行了沉积物的基本物理参数的分析研究，测量项目有颗粒大小、密度 ρ，含水量 ω，孔隙度 n，孔隙比 e，颗粒相对密度 G，塑限 W_p，液限 W_l，抗压强度 q_u 和抗剪强度等. 这些分析均按国家标准《土工试验方法 GBJ - 123 - 88》进行.

2　微观分析结果

先后对 14 个柱状样 28 个子样进行了微观分析，样品处理采用无水酒精逐级脱水，然后用离子溅射仪喷镀上一层导电金膜，在 EPM - 810Q 电子探针上进行扫描观察和拍摄微结构特征图像. 微观分析扫描观察和拍摄时放大倍数为 1 000～3 000 倍. 能谱分析主要用来确定矿物成分和化学元素百分含量. 28 个子样品取样埋深列于表 1.

表 1　28 个微观分析子样品的埋深(cm)

站位	B1 - 3	B1 - 3	B3 - 6	B3 - 6	B3 - 5	B3 - 5	B3 - 5	B3 - 1	B3 - 1	B3 - 2	99 - D	831	831	831
埋深	51	88	40	66	52	80	91	45	67	58	90	77	89	127
站位	832	832	833	834	834	835	835	99 - C	99 - C	99 - B	99 - B	B3 - 4	B3 - 4	B3 - 4
埋深	18	34	78	20	60	18	103	55	96	48	128	66	107	167

由于重力式柱状取样不能保证沉积物在取样瞬间不受扰动，尤其取样管管壁对样品的摩擦阻力十分明显和具干扰性，因此提取微观分析的子样取自柱状样截面积的中央部分，而四周

土样则作颗粒大小分析. 肉眼观察子样四周均是砂,粉砂为优势粒级. 除此之外,矿物还有伊利石、高岭石、绿泥石等,因此在微观分析之前对样品均有一定的认识,初步相信颗粒是以不整合、不圆滑的长石和石英为主的陆源物质. 微观分析的重点放在细心观察颗粒与颗粒之间的耦合和结构、接触状态、层间层理特征. 对特殊颗粒作能谱分析,之后对子样品上、下的土样进行常规的物理力学参数的分析研究.

Hamilton 等[2]将全球海洋沉积物的颗粒堆垒结构特征描述为6个类型. 高国瑞[3]首次对我国沿海海相沉积物微结构进行了研究. 梁元博等[4]在研究海底沉积物力学性质影响声速的物理机制时给出了堆垒结构和粒间取向的两种结构模型. 卢博[5]首次对南海北部大陆架沉积物微结构分类研究取得突破. 之后,1998年又对南海南部钙质土沉积物结构和声学物理性质之间的关系进行了分析研究[6]. 牛作民[7]在研究南海海底细粒土工程地质时对微结构特征作了描述和分析. 一系列关于海相沉积物结构和微结构的文献给出了各自的分析研究结果,一方面指出这些分类研究和定性研究的重要意义,同时又指出了结构类型的多样性。

本文根据14个柱状样的分析结果,初步总结归纳出珠江口外海沉积物的6种微结构类型,它们是以接触耦合状态为主要特征命名的. 与笔者[5]以往对南海北部大陆架沉积物微结构以颗粒组成为主要特征的命名不同,这里充分考虑到颗粒间的堆垒、接触、耦合、充填效应、层间层理和工程力学性质.

(1) 絮凝松散结构:以微细的、大小不等的、形状差别甚大的颗粒为主,接触松散,是海水和淡水交汇区间沉积物的主要结构特征. 含水量高,密度高,孔隙度大,抗压强度低. 见图版Ⅰ-1.

(2) 絮凝胶结结构:一般致密,以中等尺寸大小的颗粒(粉砂)为主作连接骨架,絮凝物在颗粒间作充填物,是海水和淡水交汇区中的另一种结构类型. 含水量高,密度低,孔隙度大,抗压强度低,以点状颗粒与片状絮凝物短距离接触为主. 见图版Ⅰ-2.

(3) 聚合接触结构:以各个聚集体粉砂和黏土为基本骨架,以点状或圆颗粒链状接触为主,排列堆垒致密,孔隙较小,为全海水沉积环境下的主要结构特征,主要出现在香港和澳门外海一带的近海岸沉积环境中. 见图版Ⅰ-3.

(4) 点/面接触结构:以片状沉积物的面与圆点沉积物的点接触为主,排列无序,可压缩性较大,抗压强度较低,很容易由点/面接触转换为边/面接触,孔隙开放,在荷载条件下,圆点状沉积物的点有可能发生位移、旋转和破裂. 见图版Ⅰ-4.

(5) 面/面接触结构:以片状沉积物之间互相叠瓦状堆垒为主,沉积环境稳定,颗粒排列紧凑,可压缩性不大. 抗压强度较大,接触的面稳定,不容易产生异位变化. 见图版Ⅰ-5.

(6) 混合接触结构:它混合了上述各种接触结构类型之中的某几项特征. 由于沉积物的结构多元化,互相充填的可能性很大,因此颗粒排列和堆垒互为初充,变得十分紧凑,抗压强度较大. 见图版Ⅰ-6.

3 微结构的物理性质及其工程地质意义

土的结构和微结构分析研究始于 Terzaghi[8],经历数十年工程地质界不断地深入研究,已从定性分类走向定量地解释和评价沉积物的结构层理和形变机制,但不能忽视的一个问题是微结构分类研究如果脱离相应的物理力学性质分析研究,很容易走入一个"纯"研究的怪圈里,不能在指导工程地质建设实践中作出贡献. 因此,只有紧密联系柱状样的物理力学性质才能

深入讨论工程地质意义.

珠江口及其外海沉积物14个柱状样的取样时间不同,因此有些物理力学参数的分析不尽相同. 本文就6个微结构类型的基本物理性质列于表2作为讨论的基础. 表2所示的若干项物理参数是子样品上、下位置的两段样品的平均值. 6个微结构类型的颗粒百分含量中以粉砂和土粒为主,通常砂粒级不多见,不大于20%. 砾更少见. 中值粒径反映整个样品的累积曲线在50%处的数值,$Md(\phi)$越小,颗粒越粗. 含水量是一项很重要的物理参数,由表2可见絮凝松散结构的含水量最大,混合接触结构的含水量最小. 湿密度中的絮凝松散结构最小,点/面接触结构的湿密度最大. 颗粒相对密度反映颗粒的矿物成分,这个海区各个柱状样的差别并不明显. 孔隙度中的絮凝松散结构最大,混合接触结构最小. 反映海底抗压强度的无侧限抗压强度,只有混合接触结构较大之外,其余结构类型的无侧限抗压强度都较小,说明该海区的海底承载能力很低.

表2　微结构类型的若干物理参数及其工程地质特征

类　型	颗粒百分含量(%)				$Md(\phi)$	ω(%)	ρ/ g·cm^{-3}	G	n(%)	q_u/kPa	工程地质特征
	砾	砂	粉砂	黏土							
絮凝松散结构	–	0.9	56.1	43.0	5.364	60.2	1.96	2.65	82.4	2.88	松散,不固结,强度低,在河口区常见
絮凝胶结结构	–	0.8	40.0	59.2	6.271	55.4	2.01	2.66	78.9	3.62	胶结,未固结,强度较低,在河口区常见
聚合接触结构	0.8	12.2	36.1	50.9	4.389	48.7	2.20	2.67	68.4	5.19	致密,中等强度,常见于近岸海区
点/面接触结构	–	16.0	44.2	39.8	3.487	49.1	2.30	2.66	62.1	4.88	接触脆弱,容易变形,常见于近岸海区
面/面接触结构	–	18.0	40.0	42.0	3.180	33.7	2.08	2.67	55.1	6.17	接触紧凑,抗压强度中等,常见于大陆架海底
混合接触结构	1	16.0	44.4	40.6	3.081	28.4	2.05	2.68	50.0	12.08	抗压强度较大,颗粒混合接触,常见于大陆架海底

注:Md 为中值粒径.

Hamilton曾将海底沉积物的颗粒结构分为6个类型,关键之处在于他将这些结构是否存在胶结作为划分特征. 卢博等将南海南部海底钙质土分为圆粒松散结构、圆粒－黏土胶结结构和黏土胶结结构,亦强调沉积物微结构类型是否存在胶结现象. 沉积物是否存在颗粒胶结决定了工程建筑的可靠性和作为地基基础的安全性. 有胶结或固结的海底沉积物由于颗粒紧密排列,互相胶结或固结,必然相当致密并有一定的刚度,取样管较难插入2 m以上,说明其摩擦阻力较大,同时具有一定的承载力,是海洋工程建筑施工理想的场所和地基,而以松散的絮凝物质为主的软质沉积物类型承载力必然很低. 在这些地方建构筑物,必然要对工程处理之后方可作为持力层.

沉积物的抗剪强度是由SJ－A型三轴仪测定的. 分别以胶结的混合接触结构类型的沉积物原状样和重塑饱和样进行如下实验:在不排水三轴剪切试验中,测定原状样在不同周围压力

σ_3 作用下的孔隙水压力,得孔隙压力系数 $B=0.97-1.00$[9].

将不同的 σ_3 作用下原状样的应力－应变[$(\sigma_1-\sigma_3)-\varepsilon$]关系曲线与重塑样相应曲线作比较(见图2),原状样曲线的初始段具有线性特征,且应力不大时出现应力峰值. 根据试样破坏时的摩尔圆和包络线求得原状样的不排水内摩擦角 $\varphi'=51°$和黏聚力 $C'=22$ kPa,而重塑样为 $\varphi'=0°$, $C'=5$ kPa(图3). 将原状样固结不排水试验的有效应力路线绘于 $p'-q'$坐标平面上,其中周围压力 $\sigma_3=25$,50 kPa 时的有效应力路径逐渐向右弯曲,表示样品处于固结状态(图4). 当 $\sigma_3=100$ kPa 时则向左弯曲,故属正常固结状态.

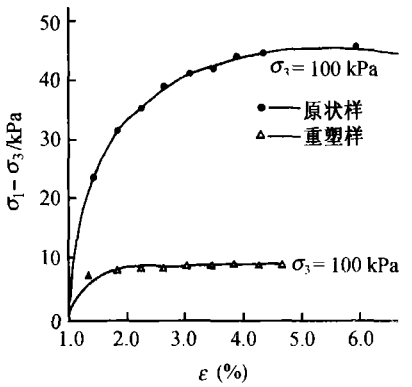


图2 胶结的混合接触结构类型沉积物不排水应力－应变曲线

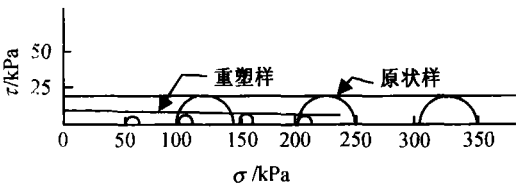


图3 胶结的混合接触结构类型沉积物三轴不排水试验的摩尔圆和包络线

根据破坏包线 f 与 p'轴的夹角($\theta=26.1°$)以及在 q'轴上的截距($a=6$ kPa)求得有效抗剪强度参数 $\varphi'=29°$和 $C'=7$ kPa. 按总应力法整理的结果(图5)所得的固结不排水抗剪强度参数 $\varphi'=16.4°$, $C'=12.5$ kPa.

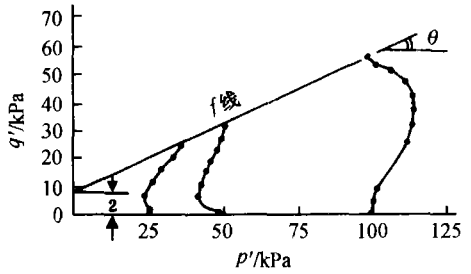


图4 胶结的混合接触结构类型沉积物的有效应力线路

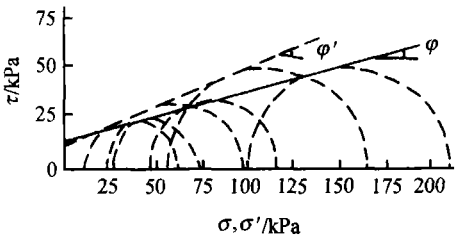


图5 胶结的混合接触结构类型沉积物固结不排水试验的摩尔圆和包络线

4 小结

通过本文的分析研究,初步弄清了珠江口外海沉积物微结构与物理力学参数之间的关系,加深了对海底沉积物物理力学特性的认识,并为珠江口外海的海洋工程地质评价和施工设计问题分析和解决提供海洋沉积学和土工学相结合的依据.

该区海底沉积物微结构类型有絮凝松散结构、絮凝胶结结构、聚合接触结构、点/面接触结构、面/面接触结构和混合接触结构6种，其中混合接触结构的沉积物具有较高的抗压强度和抗剪强度，主要分布在大陆架海底上，而由于近岸区和河口区沉积物结构接触普遍脆弱，抗压强度低，因此是不理想的工程地质基础.

海底沉积物微结构分析研究是对工程地质学的贡献，有助于深入认识海底，最终为海洋工程建设服务.

参考文献：

[1] 温耀霖，潘 健，吴湘兴. 珠江三角洲软土的微观结构与力学特性[J]. 华南理工大学学报，1995，23(1)：144～152.

[2] HAMILTON E L. Sound velocity and related properties of marine sediments, North Pacific[J]. Journal of Geophysical Research, 1970, 75(23): 4 423～4 446.

[3] 高国瑞. 中国海相沉积土微结构研究和工程地质[J]. 中国科学(B)，1984，(9)：849～856.

[4] 梁元博，卢 博. 海底沉积物力学性质影响声速的物理机制[J]. 海洋学报，1985，7(1)：111～119.

[5] 卢 博. 南海陆架沉积物微结构研究[A]. 热带海洋研究(二)[M]. 北京：海洋出版社，1986. 45～50

[6] 卢 博，李赶先，黄韶健. 南海海底钙质土声学物理性质及其工程地质意义[J]. 中国科学(D)，1998，28(5)：518～522.

[7] 牛作民. 海洋细粒沉积物工程地质性质的研究[J]. 中国科学(B)，1992，(4)：434～440.

[8] TERZAGHI K. Undisturbed clay sand samples and undisturbed clays[J]. J Boston Soc Civil Eng, 1941, (28): 211～231.

[9] 杨位洸，温耀霖，卢 博. 珠江口外浅海区底质的工程性质研究[J]. 华南理工大学学报. 1995，23(1)：135～143.

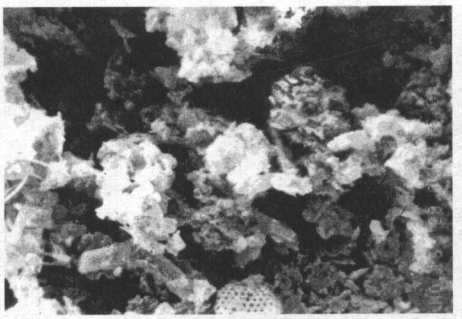
Micro-structure features of sediment and its physical characteristics in off-sea of the Zhujiang River mouth

LU Bo[1], LI Chuan-rong[2]

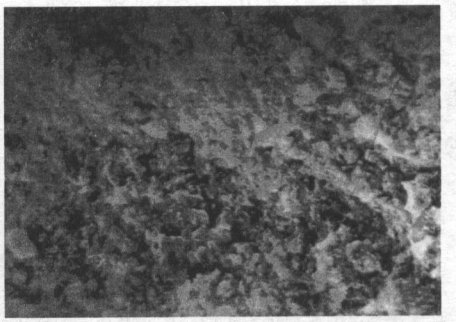
(1. *Opening Laboratory of Margin Sea Geology and Ancient Environment of South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou* 510301, *China*; 2. *Marine Instrument Centre of South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou* 510301, *China*)

Abstract: A micro-structural theory and a technical method of Quaternary geology are used to study engineering geological estimating problems of sediments in off-sea of the Zhujiang River mouth. Soft soil structures, micro-structure and classification characteristics are analysed by using method of electron microscope. On the basis of analysing physical – mechanical characteristic parameters, the relation among grain contact, grain accumultion and porosity with physical – mechanical characteristics of sediments are studied. The study result shows that there are 6 micro-structural types in sediments of off-sea of the Zhujiang River mouth, and among these, the mixed contact structural sediment has higher compressive strength than others.

Key words: Zhujiang River mouth; Quaternary geological sediments; micro-structure; soil mechanics



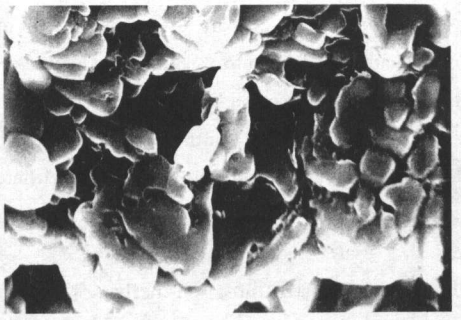
1



2

3

4



5

6